Conservazione predittiva di edifici storici attraverso un sistema basato sull'IoT

Marco Limongiello
Angelo Lorusso
Anna Sanseverino
Barbara Messina

Abstract

La conservazione del patrimonio culturale è l'insieme di interventi e azioni atti a proteggere beni artistici, architettonici e paesaggistici di particolare rilievo, garantendo la trasmissione del loro valore alle generazioni presenti e future. L'avvento delle nuove tecnologie ha ampliato le possibilità e le strategie disponibili per il monitoraggio di spazi costruiti, compresi quelli di interesse culturale. Questo articolo presenta un sistema in grado di garantire un'efficace conservazione preventiva attraverso il controllo ambientale attivo e l'internet delle cose (IoT). La strategia è stata applicata a un'importante villa romana, la villa di Domiziano a Sabaudia (Italia), situata all'interno del Parco Nazionale del Circeo. La vasta villa di epoca imperiale, seconda per dimensioni solo a villa Adriana a Tivoli, è ancora poco esplorata. L'applicazione proposta riguarda la "Cisterna delle navi", situata nell'area centrale della villa e caratterizzata dalla presenza di graffiti nautici. Il monitoraggio dei parametri ambientali è stato implementato attraverso un sistema di controllo remoto, installando sensori digitali all'interno della struttura. I dati vengono raccolti con flusso continuo attraverso una piattaforma integrata di supervisione, monitoraggio e gestione condivisa, basata su tecnologia web-cloud-IoT. L'applicazione dei sistemi IoT nel monitoraggio del clima ha facilitato la previsione dell'umidità all'interno delle strutture da conservare per la simulazione e per l'invio di avvisi d'allerta in caso di emergenza, così da prevenire il distacco dell'intonaco, e quindi la possibile perdita dei graffiti.

Parole chiave
Internet delle cose (IoT), sensori, conservazione preventiva, patrimonio culturale, BIM

Dal rilievo all'IoT: una sintesi grafica della metodologia proposta. Elaborazione dell'autore.

doi.org/10.3280/oa-832-c162

Introduzione

La conservazione del *Cultural Heritage* comprende tutte le misure e le azioni volte a salvaguardare beni artistici, architettonici e paesaggistici di particolare rilievo, facendo sì che aspetti materiali e valori culturali a essi correlati siano accessibili alle generazioni presenti e trasmissibili a quelle future. In ambito architettonico, la conservazione preventiva (CP) del patrimonio costruito di interesse storico, riferibile al campo più ampio della salvaguardia del *Cultural Heritage,* può essere quindi definita come l'insieme delle azioni volte a prevenire e ridurre tanto la potenziale perdita di materiale, quanto l'eventuale danno al patrimonio culturale tangibile [Fatta 2015, pp. 446-475]. Tra le azioni possibili, il controllo dei parametri ambientali di un edificio è una delle più complesse e costose, spesso ulteriormente complicata dalla natura stessa degli edifici storici e dall'accessibilità concessa ai visitatori. In particolare, la ricerca rivolta alla risposta strutturale indotta dall'azione di fattori ambientali – quali ad esempio l'umidità relativa (UR) – sugli elementi architettonici che compongono un edificio ha dimostrato che il rischio a essi associato andrebbe valutato caso per caso. Il contributo si concentra su questi ultimi aspetti, proponendo un approccio basato sulla gestione del rischio derivante da parametri ambientali, con l'intento di selezionare la temperatura specifica (T) e l'umidità relativa (UR) più opportune ai fini della sperimentazione. La base della ricerca è una conoscenza ambientale approfondita, in termini di dati storici relativi al clima dello spazio indagato. A tal fine è generalmente necessario almeno un anno di monitoraggio microclimatico e di raccolta dati, in modo da valutare se le variazioni ambientali siano tollerabili per gli elementi architettonici. In alcuni casi, infatti, la variazione di UR, verso valori potenzialmente anche migliori rispetto a quelli storicamente consolidati, potrebbe portare a danni permanenti e irreversibili, se non correttamente ponderata. In particolare, gli sviluppi della tecnologia dell'informazione (IT) e dell'*Internet of Things* (IoT) sono significativi per il raggiungimento dei suddetti obiettivi [Colace et al. 2021, pp. 377-382].
A partire da queste considerazioni, l'approccio proposto sperimenta, attraverso un accesso basato su *cloud,* la possibilità di un monitoraggio continuo online in tempo reale e la supervisione dei dati registrati da sensori collocati all'interno dello spazio indagato. Questa metodologia, che si presta a una efficace conservazione preventiva del patrimonio costruito, mira pertanto a ottimizzare l'uso delle risorse, evitando costose e invasive installazioni in loco e permettendo una supervisione globale di interi edifici storici o di parti di essi.
Grazie alle tecnologie IoT è infatti possibile definire facilmente soglie critiche relative ai parametri ambientali, per le quali segnalare ipotetici scenari di danno nell'ottica della conservazione e del monitoraggio *low cost* dei beni culturali [Giordano 2019, pp. 34-43]. È importante sottolineare quanto sia cruciale questo flusso di lavoro al fine di migliorare il processo decisionale per le azioni di CP e operare cambiamenti appropriati nelle condizioni ambientali. Questo processo è infatti molto complesso [Scandurra et al. 2018, pp. 1037-1044] e richiede l'integrazione delle conoscenze multidisciplinari provenienti da diversi ambiti di ricerca scientifica [Boje et al. 2020]. La sperimentazione condotta ha visto, nello specifico, una gestione collaborativa di dati e informazioni da parte delle varie figure coinvolte (ingegneri, architetti e archeologi). Gli sviluppi tecnologici qui descritti sono stati applicati al monitoraggio dell'area centrale della villa Imperiale di Domiziano [Limongiello et al. 2020, pp. 316-321], con particolare riferimento alla zona occupata dalle cisterne ricavate in strutture preesistenti del complesso di epoca romana. Tra le cisterne finora emerse, quella oggetto dello studio proposto è la "Cisterna delle navi", che prende il nome dai graffiti incisi sulle sue pareti interne e raffiguranti proprio alcune imbarcazioni (fig. 01).

Fig. 01. Sezione longitudinale dalla nuvola di punti TLS della cisterna con identificazione della posizione di un graffito: a) immagine fotografica; b) schizzo a mano [Boetto 2002, pp. 399-408].

Caso studio

Il lavoro presentato è parte del progetto *The Domitian Villa: An Imperial Residence in Sabaudia*, *Italy,* vincitore della sovvenzione 2019 per il programma *Shelby White and Leon Levy,* che ha visto la partecipazione, tra gli altri, del gruppo di ricerca del settore scientifico del Disegno dell'Università degli Studi di Salerno. Nel dettaglio, il contributo illustra l'esperienza condotta sulla "Cisterna delle navi" (risalente al I sec. a.C.), situata nella zona nord della cosiddetta "Area delle cisterne" (fig. 02). Si tratta, nello specifico, di un insieme di tre edifici che assunse questa destinazione funzionale durante la prima metà del I secolo d.C. (terza fase costruttiva del complesso), quando furono costruite due ulteriori enormi cisterne: la "Cisterna dell'eco" e la "Cisterna di raccolta", collegate al sistema di approvvigionamento idrico più vecchio attraverso nuovi collettori.
La "Cisterna delle navi" [Boetto 2002, pp. 399-408] consiste in un'unica stanza coperta da una volta a botte dotata di un pozzo di ventilazione (al centro del quale c'è un tombino quadrato di 0,90x0,90 m); il pavimento e le pareti sono intonacate e/o coperte di cocciopesto con un cordolo angolare.
Sul tetto della struttura c'era una terrazza, accessibile tramite una scala esterna. Le uscite dell'acqua erano situate sui lati sud e ovest, come testimoniano le impronte delle *fistulae,* mentre il canale d'ingresso era probabilmente situato sul lato est. In una fase posteriore, questo fu trasformato in una porta e, probabilmente, la cisterna in un *ergastolum:* i graffiti rinvenuti sulle pareti, raffiguranti navi e imbarcazioni, che danno il nome alla cisterna risalgono proprio a quest'epoca. Di fatto, quasi tutte le rappresentazioni identificano navi – di diverse tipologie (da carico, con albero, navi da guerra ecc.). Le pareti interne sono ricoperte da uno spesso intonaco di cocciopesto interessato da scheggiature più o meno estese, con conseguenti danni ai graffiti stessi, che si sviluppano nella maggior parte dei casi a un'altezza di circa 1,5 m, lungo le due pareti più estese. Sulla base delle caratteristiche morfologiche è stato possibile distinguere almeno ventitré diversi nuclei di graffiti, che sembrano essere stati eseguiti da alcuni autori differenti.

Acquisizione ed elaborazione dei dati

Al fine della sperimentazione della metodologia proposta è stato innanzitutto necessario disporre di dati metrici e di un modello digitale della cisterna per la successiva simulazione con sensori, motivo per cui sono stati previsti due diversi tipi di rilievo tridimensionale: un primo rilievo fotogrammetrico tramite APR (Aeromobile a Pilotaggio Remoto), per l'acquisizione delle coperture e del contesto circostante all'interno della "Area delle cisterne"; un secondo rilievo effettuato con Laser Scanner Terrestre (TLS) per l'acquisizione dei soli interni della "Cisterna delle navi".
Il sistema APR impiegato per questa applicazione è un DJI Matrice 210 V2 con un peso netto del sensore di circa 4,7 kg con installata una telecamera DJI X7 (sensore APC, dimensione 23,5×15,7 mm, Pixel size 3,91 µm) e con obiettivo fisso DJI DL/DL-S da 16 mm. Per l'acquisizione delle prese fotogrammetriche nadirali si è optato per una doppia acquisizione ortogonale, realizzata tramite una modalità automatica del piano di volo. I risultati hanno mostrato un GSD pari a 8 mm per l'altezza di volo di 33 m, con una sovrapposizione longitudinale dell'80% e una sovrapposizione trasversale del 60%. Il numero di immagini acquisite e successivamente elaborate è di 333, corrispondenti a un'area di circa 0,8 ettari. Per generare poi la nuvola di punti del modello 3D e dell'ortofoto nadirale dell'area rilevata è stato utilizzato il software Agisoft Metashape (ver. 1.7.3 build 12473). Per la georeferenziazione e la valutazione della precisione del modello 3D generato a valle del processo fotogrammetrico, sono stati misurati 6 punti di controllo a terra (GCP), materializzati sul terreno attraverso target fotogrammetrici (60x60 cm) e chiodi topografici. Il sistema di riferimento adottato è UTM/ETRF00 con altezza ellissoidica. La precisione raggiunta nella planimetria è mediamente centimetrica, mentre raggiunge circa 2,5 cm in altimetria. La rete è stata georeferenziata utilizzando misurazioni GNSS in modalità *real-time kinematic.*

Fig. 02. Ortofoto nadirale da APR della "Area delle Cisterne" – "Villa di Domiziano", Sabaudia (Italia). Elaborazione dell'autore.

Lo scopo del rilievo TLS era la creazione di una nuvola di punti densa e precisa, per la successiva integrazione con la nuvola di punti aerofotogrammetrica. Inoltre, il TLS è insostituibile per il rilievo di spazi stretti e scarsamente illuminati, come l'interno della "Cisterna delle navi". In questo caso è stato utilizzato il TLS Faro Focus X330 (Range da 0,6 m a 330 m, Velocità massima di misura 976.000 punti/secondo, Campo visivo verticale/orizzontale 300°/360°, Ranging Error 4 mm @ 10m). La fase di acquisizione ha previsto due sole posizioni di scansione, ottenute in trenta minuti di lavoro. Per facilitare la fase di allineamento, sono stati disposti target sferici di 15 cm di diametro montati su un supporto (tripode) per migliorarne la visibilità dalle posizioni di scansione. Entrambe le scansioni – distanziate di 7 m in linea d'aria – sono state eseguite con le seguenti impostazioni: 3 mm @ 10 m con una qualità dello strumento impostata su 4x, evitando l'acquisizione del dato colorimetrico (RGB).
Un ulteriore obiettivo di questa prima fase di acquisizione dati era rilevare almeno parzialmente i graffiti sui muri con il solo mezzo della mappa di riflettanza, cosa che si è rivelata possibile solo in rare aree di intonaco. Le scansioni TLS sono state allineate utilizzando una semplice procedura del tipo *Iterative Closest Point* (ICP) per la grande sovrapposizione tra le scansioni e la semplicità della vasca dal punto di vista geometrico. La nuvola TLS (interno della cisterna) è stata registrata nello stesso sistema di coordinate dell'esterno, utilizzando una rete di 16 punti di controllo misurati da stazione totale.
Si è pertanto ottenuta un'unica nuvola di punti della sola "Cisterna delle navi", che include contemporaneamente l'interno e l'esterno, in modo da ricavare gli spessori delle pareti necessari alla successiva simulazione con sensori in ambiente BIM (*Building Information Model)*.

Modellazione e simulazione

La ricerca proposta in questa sede riguarda il monitoraggio ambientale della "Cisterna delle navi", attraverso una integrazione di nuove tecnologie IoT applicate al concetto di HBIM, con lo scopo di prevenire possibili complicazioni nelle operazioni di conservazione del patrimonio esistente. Pertanto, una volta elaborato il modello digitale della cisterna in ambiente BIM, il lavoro si è concentrato sulla caratterizzazione climatica degli spazi interni e sul monitoraggio in simultanea dei dati ambientali esterni.

La prima fase ha riguardato le indagini sperimentali necessarie e il monitoraggio climatico per identificare la serie storica di input. La seconda fase ha considerato poi la definizione e la validazione dei livelli di temperatura e umidità appropriati per la conservazione dello stato di fatto. A tale scopo è stato installato un sistema di controllo e monitoraggio in tempo reale tramite nodi IoT. In particolare, la sperimentazione ha inteso implementare un *Digital Twin* basato su un modello HBIM, integrato poi con una piattaforma per l'elaborazione e visualizzazione dei dati in *cloud* denominata *ThingsBoard.* L'implementazione del sistema tramite *ThingsBoard* – una piattaforma *open-sourc*e dedicata alla gestione dei dispositivi IoT mediante la raccolta – permette infatti di comunicare con i dispositivi in tempo reale, attraverso differenti protocolli utilizzati per collegare i sensori per il monitoraggio ambientale al sistema elaborato.
Il flusso di lavoro proposto comprende la raccolta dei dati registrati dai sensori, la loro integrazione, la definizione di un meccanismo di controllo parametrico, di moduli di visualizzazione per una facile gestione e monitoraggio e la possibilità di attivare procedimenti di scelta autonoma per migliorare il controllo della temperatura di rugiada (fig. 03). La metodologia sperimentata può essere organizzata in tre fasi, tra loro interrelate: *Data Ingestion, Data Processing* e *Data Visualization*. Il primo livello del processo, il *Data Ingestion*, è responsabile della raccolta dei dati grezzi dai sensori installati, mentre nella fase di *Data Processing* questi stessi dati vengono recuperati dal cloud per generare informazioni utili all'analisi predittiva dell'oggetto monitorato. In particolare, i dati acquisiti dai sensori vengono combinati e integrati con i dati provenienti dal BIM. Infine, la *Data Visualisation* corrisponde a una rappresentazione strutturata dei dati. Ciò può avvenire sia attraverso *dashboard*, dove i dati desunti dai sensori vengono mostrati sotto forma di grafici, che all'interno del modello BIM, in cui possono essere importati per mezzo di uno script Dynamo per Revit dedicato ottenendo così una visualizzazione tridimensionale delle informazioni ritenute utili.
Per simulare le reazioni del *Digital Twin* (DT) sul modello, è stata sviluppata un'estensione in grado di comunicare in tempo reale con la piattaforma *ThingsBoard*, dal momento che, allo stato, Dynamo BIM non fornisce la possibilità di interagire con software e dati esterni. Sfruttando l'API (Interfaccia di Programmazione delle Applicazioni) [Ippoliti et al. 2020, pp. 1047-1060] disponibile nella piattaforma in cloud, è stato possibile costruire nodi Dynamo personalizzati, per consentire la lettura in tempo reale delle informazioni provenienti da ogni sensore sul campo. Nello specifico, per far comunicare *Thingsboard* con Dynamo, i nodi sono stati implementati attraverso il linguaggio C# e importati nell'interfaccia di programmazione grafica sotto forma di pacchetti con le credenziali di accesso dell'account *Thingsboard.*
Il caso studio si focalizza sull'impostazione di un DT del modello strutturale della cisterna oggetto di indagine, collegando, in primo luogo, la struttura a un sensore DHT 11 MEMS che monitora i parametri richiesti dello stato attuale ed è interconnesso a un microcontrollore. I dati acquisiti sono stati memorizzati in cloud dalla piattaforma che ha permesso di leggere e visualizzare correttamente i parametri registrati, filtrandoli in base al sensore selezionato. Per quanto attiene alla modellazione HBIM del serbatoio sono state seguite le fasi consolidate della procedura *Scan-to-BIM*. In primo luogo, la nuvola di punti integrata è stata importata in ambiente Autodesk ReCap, selezionando solo l'area d'interesse. La topografia del sito e i muri di contenimento sono stati poi modellati in Revit utilizzando famiglie di sistema e la nuvola come riferimento. Data la particolare geometria della cisterna voltata a botte, per questa si è utilizzata la modellazione "*in-place*". Agli elementi da monitorare sono quindi stati assegnati parametri condivisi testuali di istanza (es. "Temperatura Interna", "Temperatura Esterna", "Umidità Interna", "Umidità Esterna"), popolati poi in ambiente HBIM, con i dati in tempo reale provenienti dai sensori (fig. 04); indispensabile allo scopo, come già osservato, l'impiego di Dynamo per Revit [Di Filippo et al. 2021, pp. 110-115].
Il sistema elaborato ha dunque previsto l'utilizzo di API esterne dedicate, collegabili automaticamente alla piattaforma *ThingsBoard* per l'acquisizione dei dati reali e poi, attraverso uno script VPL di Dynamo, direttamente al DT modellato in BIM. Il collegamento vero e proprio tra il sensore e il BIM è stato definito attraverso la generazione di famiglie specifiche e l'impostazione di parametri condivisi da popolare con i valori derivati dalle condizioni effettive del modello fisico in tempo reale.

L'utilizzo di dati aggiornabili automaticamente e in tempo reale può supportare i conservatori e i restauratori nei loro studi, simulando gli effetti di possibili azioni correttive sul DT (fig. 03), grazie al *feedback* immediato. L'obiettivo è infatti quello di salvaguardare l'integrità del bene strutturale e prevenire possibili alterazioni causate da eccessiva umidità superficiale e cicli di asciutto-bagnato che possono alterarne le caratteristiche fisiche.
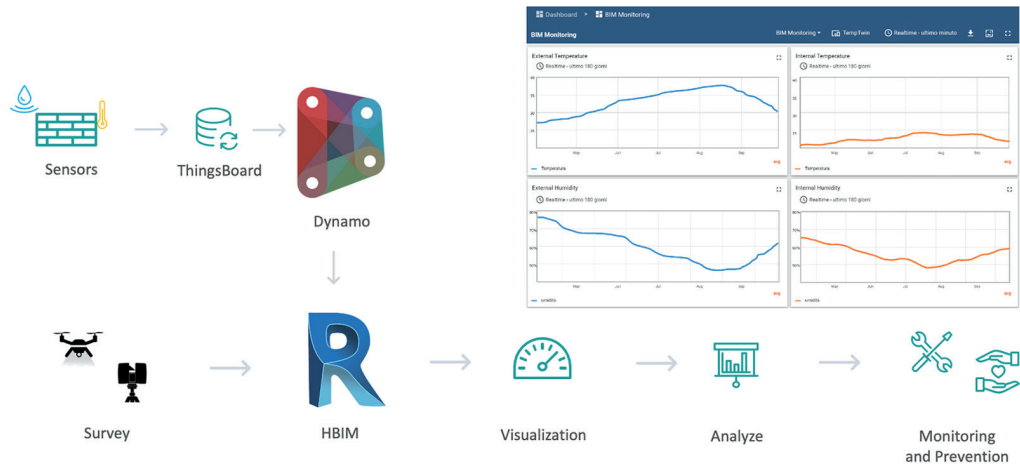
Fig. 03. Architettura del sistema di monitoraggio e visualizzazione dei dati. Elaborazione dell'autore.
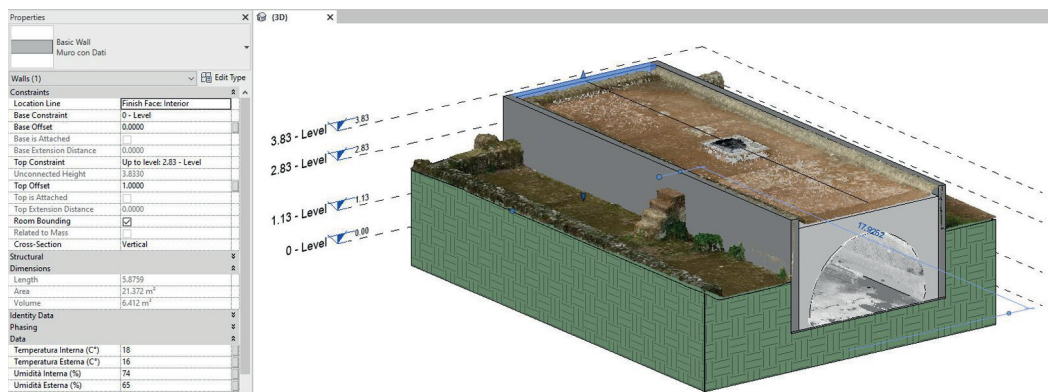
Fig. 04. Modello HBIM della "Cisterna delle navi" in Autodesk Revit. Elaborazione dell'autore.

Risultati e conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è lo sviluppo di una metodologia per supportare i conservatori e i restauratori nel monitoraggio e la visualizzazione dei dati di temperatura e umidità di uno spazio di interesse storico. I dati provenienti dai sensori possono essere facilmente rappresentati all'interno dell'ambiente BIM per supportare le decisioni che richiedono competenze interdisciplinari [Desogus et al. 2021]. La metodologia proposta ricorre infatti all'uso di una piattaforma basata sull'IoT – *ThingsBoard* – che permette la comunicazione tra i sensori e il software Dynamo per accedere ai dati registrati dai sensori, aggiornando così automaticamente le informazioni contenute nel modello BIM. L'approccio proposto nella "Cisterna delle navi" si basa, per l'appunto, su un sistema di monitoraggio a distanza in grado di valutare e simulare le condizioni ambientali all'interno dell'edificio, al fine di preservare le parti in muratura, gli intonaci e gli elementi in legno.
A tale scopo, una volta definito il concetto di umidità e temperatura di rugiada, è stato definito un meccanismo di allarme con feedback immediato, introducendo e convalidando con successo un sistema di controllo attivo delle condizioni climatiche dei locali indagati.

Infine, grazie ai dati raccolti in un database, è stato possibile creare famiglie dedicate per visualizzare e interrogare il modello in ambiente BIM.
I risultati sperimentali, sebbene preliminari, hanno prodotto esiti promettenti, per cui una futura implementazione del sistema potrebbe includere l'applicazione di tecniche di *Machine Learning* sulla base dei dati raccolti e di eventuali sensori aggiuntivi che possano essere integrati con quelli già presenti al fine di sperimentare ulteriori tecniche, come l'uso di telecamere termiche.

Riferimenti bibliografici

Boetto, G. (2002). La "cisterna delle navi" nella villa di Domiziano al Circeo. In *Archeologia subacquea: studi, ricerche e documenti,* 3, pp. 399-408.

Boje, C., et al. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. In *Automation in Construction,* vol. 114.

Colace, F., et al. (2021). *An IoT-based Framework to Protect Cultural Heritage Buildings.* IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2021. 7th IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2021. 23/27 August 2021, pp. 377-382.

Desogus, G., et al. (2021). BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings. In *Sustainability,* 13 (8), 4496.
<https://doi.org/10.3390/su13084496> (consultato il 21 marzo 2022).

Di Filippo, A., et al. (2021). Generative design for project optimization. In. *DMSVIVA 2021: 27th International DMS Conference on Visualization and Visual Languages,* pp. 110-115.

Fatta, F. (2015). *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying. Modeling, and Representation,* pp. 446-475.

Giordano, A. (2019). New interoperable tools to communicate knowledge of historic cities and their preservation and innovation. In Advances in Intelligent Systems and Computing, n. 919, pp. 34-43.

Ippoliti E., Massimetti M., Testa A. (2020). I*t's time for data! modulations of representation: Visible, perceptible, imaginable. Advances in Intelligent Systems and Computing.* 1st International and Interdisciplinary Conference on Image and Imagination, IMG 2019. Alghero. 4/5 July 2019. Volume 1140, pp. 1047-1060.

Limongiello, M., Ronchi, D., Albano, V. (2020). BLK2GO for DTM generation in highly vegetated area for detecting and documenting archaeological earthwork anomalies. In *Metrology for Archaeology and Cultural Heritage*, MetroArchaeo 2020, Trento, Virtual Conference, Italy ,22 - 24 ottobre 2020, pp. 316-321.

Scandurra, S., et al. (2018). *Integrated survey procedures for the virtual reading and fruition of historical buildings.* International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42 (2), pp. 1037-1044.

Autori
Marco Limongiello, Università degli Studi di Salerno, mlimongiello@unisa.it
Angelo Lorusso, Università degli Studi di Salerno, alorusso@unisa.it
Anna Sanseverino, Università degli Studi di Salerno, fasanseverino@unisa.it
Barbara Messina, Università degli Studi di Salerno, bmessina@unisa.it

Per citare questo capitolo: Limongiello Marco, Lorusso Angelo, Sanseverino Anna, Messina Barbara (2022). Conservazione predittiva di edifici storici attraverso un sistema basato sull'IoT/ Predictive preservation of historic buildings through IoT-based system. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers.* Milano: FrancoAngeli, pp. 2607-2620.

Isbn 9788835141938

Predictive preservation of historic buildings through IoT-based system

Marco Limongiello
Angelo Lorusso
Anna Sanseverino
Barbara Messina

Abstract

Cultural Heritage conservation is the set of interventions and actions to protect particularly valuable artistic, architectural and landscape assets, ensuring the accessibility of their values to present and future generations. The advent of new technologies introduced many possibilities and new strategies to monitor environments, including those with cultural value. This paper presents a system able to guarantee effective preventive conservation through active environmental control and Internet of Things (IoT) technologies. The strategy was applied to an important Roman villa, the villa of Domitian in Sabaudia (Italy), located within the Circeo National Park. It is a vast imperial villa, second in size only to Hadrian's villa in Tivoli, yet minimally explored. The proposed application concerns the *Cisterna delle Navi*, which is located in the central area of the villa and characterized by the presence of nautical graffiti. The monitoring of the environmental parameters was implemented through a remote-control system, installing digital sensors inside the structure. Data are collected continuously through integrated supervision, monitoring, and shared management platform, based on web-cloud-IoT technology. The application of IoT systems in climate monitoring and control facilitated the prediction of humidity within the structures to be preserved so as to simulate and provide some alerts in case of emergency to prevent the detachment of the plaster, and therefore the possible graffiti loss.

Keywords
Internet of Things (IoT), sensors, preventive conservation, cultural heritage, BIM

From survey to IoT: a graphic synthesis of methodology proposed. Author's elaboration. (1911/1935).

doi.org/10.3280/oa-832-c162

Introduction

Cultural heritage preservation encompasses all measures and actions designed to safeguard particularly valuable artistic, architectural and landscape assets while ensuring that their materials and values remain accessible to present and future generations. In the architectural field, preventive conservation (PC), within the broader field of Cultural Heritage preservation, can be defined as the set of actions aimed at preventing and reducing the potential for material loss and damage in the tangible Cultural Heritage [Fatta 2015, pp. 446-475]. Among the possible actions, controlling environmental parameters of a building is one of the most complex and costly; it often is further complicated by the very nature of historic buildings and the visitors demand for access. In addition, research on the structural responses of architectural elements associated with environmental factor – such as Relative Humidity (RH) – has shown that their exposure to risk should be assessed on an object-by-object basis.
The paper focuses on these latter aspects, proposing a management-based approach to the risk arising from environmental parameters to select Temperature (T) and Relative Humidity (RH) specifications most suitable for testing purposes. The basis of the research is the knowledge of the environmental, i.e., climatic historicity of the building under study. For this purpose, at least one year of microclimate monitoring and data collection is generally required in order to assess whether the environmental changes are tolerable for the architectural elements. In some cases, in fact, a change in a RH value from the historically consolidated datum to a potentially better one, can lead to permanent and irreversible damage, if not properly weighted. In particular, developments in information technology (IT) and the Internet of Things (IoT) are significant for the achievement of the aforementioned objectives [Colace et al. 2021, pp. 377-382].
Starting with these considerations, the proposed approach experiments, through cloud-based access, the possibility of a continuous real-time online monitoring and easy supervision of the data recorded by the sensors placed within the investigated area. Therefore, this methodology, which is suitable for effective preventive conservation of the built heritage, aims to optimize the use of resources and to avoid costly and invasive on-site installations, allowing overall supervision of parts or entire historical buildings.
So, thanks to IoT technologies, it is possible to easily define critical thresholds to signal hypothetical damaging scenarios for Cultural Heritage low-cost conservation and monitoring [Giordano 2019, pp. 34-43] of environmental parameters. It is important to highlight how crucial the workflow is in order to improve the decision-making process for PC actions and operate appropriate changes in environmental conditions. This process is highly complex [Scandurra et al. 2018, pp. 1037-1044] and requires the integration of multidisciplinary knowledge from different fields of scientific research [Boje et al. 2020]. The experimentation carried out specifically involved the collaborative management of data and information from the various figures involved (engineers, architects and archaeologists). Here, the technological developments above described were applied to the monitoring of the central area of the Imperial villa of Domitian [Limongiello et al. 2020, pp. 316-321 with particular reference to the area occupied by the cisterns built into pre-existing structures of the Roman complex. Among the cisterns that have emerged to date, the one subject to the proposed study is the *Cisterna delle Navi,* which takes its name from the engraved graffiti that depict ships found on its walls (fig. 01).

Fig. 01. Longitudinal section from TLS point cloud of the Cistern with identification of the position of a graffito: a) photographic image; b) hand sketch (G. Boetto, 2002).

Case study

The work presented in this paper is part of the *The Domitian Villa: An Imperial Residence in Sabaudia*, Italy project, winner of the 2019 Grant for the *Shelby White and Leon Levy program*, which saw the participation, among others, of the research group of the Scientific Sector of Drawing of the University of Salerno. In detail, this paper illustrates a test case for the *Area delle Cisterne.* Namely, our case study, the *Cisterna delle Navi* (built around the 1st century BC), is located in the northern area (fig. 02). The functional destination of the area, consisting of three assets, becomes certain during the third constructive phase (first half of the 1st century AD), when two huge cisterns were built: the *Cisterna dell'Eco* and the *Cisterna di Raccolta.* These two additional cisterns were connected to the oldest water supply system through new collectors. The close relationship of the investigated area with the cistern is underlined by an underground corridor. The *Cisterna delle Navi* [Boetto 2002, pp. 399-408] consists of a single room covered by a barrel vault equipped with a ventilation shaft (in the middle of which there is a 0.90x0.90 m square manhole); the floor and walls are covered with plaster and/or *cocciopesto* with an angular curb.
Outside, there was a terrace on the roof of the structure, accessible by an external staircase. The water outlets were located on the West and South sides, as evidenced by the imprints of the *fistulae*, while the entrance channel had to be located on the East side. In a second phase, the entrance channel was transformed into a door and, perhaps, the cistern into an *ergastolum*: the *graffiti* discovered on the walls and depicting ships and vessels, that give its name to *Cisterna delle Navi,* date back to this era. Indeed, almost all the representations identify vessels – even of different types (cargo, masted, warships, etc.). The interior walls are covered with a thick *cocciopesto* plaster that has been affected by more or less extensive chipping, with consequent damage to the *graffiti.* These are in most cases developed at 1.5m height, along the two largest walls. It was possible to distinguish at least twenty-three different *graffiti* cores, which seem to have been executed by a few different hands from the morphological characteristics.

Data acquisition and processing

In order to test the proposed methodology, it was first necessary to obtain metric data and a digital model of the tank for subsequent simulation with sensors. Namely, two different types of three-dimensional survey were planned: the former was a photogrammetric survey by UAV (Unmanned Aerial Vehicle), for the acquisition of the topography and roofs of the entire *Area delle Cisterne;* the latter was carried out with Terrestrial Laser Scanner (TLS) for the acquisition of the interiors of the *Cisterna delle Navi* only.
The UAV system used for this application is a DJI Matrice 210 V2 with a net weight of the sensor of about 4.7 kg with an installed DJI X7 camera (APC sensor, dimension 23.5×15.7 mm, Pixel size 3.91 µm) with fixed lens DJI DL/DL-S of 16 mm. For the acquisition of the nadiral photogrammetric shots, a double orthogonal capture, realised via an automatic flight plan mode, was chosen. The results showed a GSD equals to 8 mm at the flying height of 33 m, using 80% along-track and 60% across-track image overlap. The number of images acquired and subsequently processed is 333, detecting an area of about 0.8 ha.
For the generation of the point cloud, the 3D Model and the nadiral orthophoto of the surveyed area, the software Agisoft Metashape (ver. 1.7.3 build 12473) was used. In support of the photogrammetric project, 6 Ground Control Points (GCP) were measured for georeferencing and assessment of the accuracy of the generated 3D model. The GCPs were materialized on the ground using photogrammetric targets (60x60 cm) and topographic nails. The reference system adopted is UTM/ETRF00 with ellipsoidal height. The precision achieved in the planimetry is on average centimetric while in altimetry it reaches about 2.5 cm. The network was georeferenced by real-time kinematic GNSS observations. The aim of TLS surveying was the creation of a dense and accurate point cloud, for subsequent integration with the aero-photogrammetric point cloud.
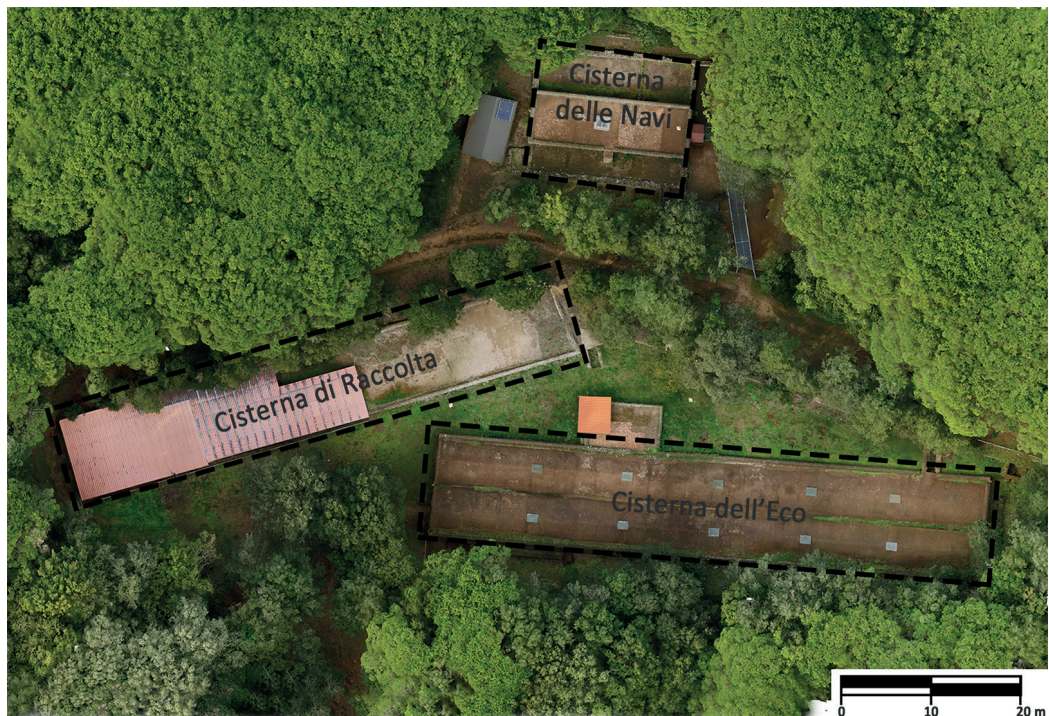
Fig. 02. Nadiral orthophoto from UAV "Area delle Cisterne" - "Villa di Domiziano", Sabaudia (Italy). Author's elaboration.

Moreover, TLS is irreplaceable for surveying narrow and darkly lit spaces, such as the inside of the *Cisterna delle Navi.* In this scenario, the TLS Faro Focus X330 used was (Range 0.6 m to 330 m, Max Measurement Speed 976,000 points/second, Vertical/Horizontal Field of View 300°/360°, Ranging Error 4 mm @ 10m). The acquisition phase included only two scan positions, obtained in half an hour's working time. In order to ease the alignment phase, we used spherical targets of 15 cm diameter mounted on a support (tripod) to improve visibility from scan positions. Both scans – spaced from a baseline of 7 m – were performed with the following settings: 3 mm @ 10 m with a quality set by the instrument of 4x, avoiding the acquisition of the RGB information. In this first phase, the aim was to attempt to partially detect the graffiti on the walls by the sole means of the reflectance map, which proved possible only in rare areas of plaster.
The TLS scans were aligned using a simple Iterative Closest Point (ICP) procedure due to the large overlap between the scans and the geometric simplicity of the tank. The TLS cloud (cisterna interna) was registered into the same coordinate system of the exterior, employing a network of 16 control points surveyed by total station. Therefore, a single point cloud of the *Cisterna delle Navi* alone was obtained, including its interior and exterior at the same time, so to derive the necessary wall thicknesses for the simulation with sensors in a BIM (Building Information Model) environment that was subsequently pursued.

Modelling and simulation

The research proposed in this paper regards the environmental monitoring of the *Cisterna delle Navi,* integrating new IoT technologies applied to the concept of HBIM with the aim of preventing possible complications in the conservation of the existing heritage. To this purpose, once a digital model of the tank was developed in a BIM environment, the work focused on the climatic characterisation of the internal environments and the simultaneous monitoring of external environmental data. The first phase focused on experimental investigations and climatic monitoring to identify historical input data. The second phase concerned the definition and validation of the appropriate temperature and humidity levels for the preservation of the state of affairs, through the installation of a real-time control and monitoring system via IoT nodes.

The entire monitoring and control phase is managed through a Digital Twin based on an HBIM model and integrated with a cloud-based data management platform named "ThingsBoard". The system was implemented using ThingsBoard – an open-source cloud platform dedicated to the management of IoT devices – capable of communicating with the devices in real time via different protocols, used to connect the sensors for environmental monitoring to the platform.
The proposed workflow includes the collection of sensor data, their integration, a parametric control mechanism, visualization modules for easy management and monitoring, and the possibility of activating autonomous choice mechanisms to improve dew-point temperature control (fig. 03). Indeed, the workflow presented can be divided into three phases: Data Ingestion, Data Processing and Data Visualization, which interact with each other. Data Ingestion is the first level of the process and is responsible for the raw data collection from the installed sensors, then in the data processing stage the raw data is retrieved from the cloud to generate knowledge useful for the predictive analysis of the monitored object. In particular, sensors data are combined and integrated with data from BIM. Finally, the data visualisation, refers to a structured display of the data both through dashboards that allow to visualise the data coming from the sensors in the form of graphs, and within the BIM model, importing the data through a dedicated Dynamo script, thus obtaining a three-dimensional visualisation of the relevant information.
To simulate the reactions of the Digital Twin (DT) on the model, an extension has been developed that can communicate in real-time with the ThingsBoard platform. As a matter of fact, Dynamo BIM does not provide the possibility to interact with external software and data. Taking advantage of the API (Application Programming Interface) [Ippoliti et al. 2020, pp. 1047-1060] provided by the cloud platform, it was possible to build customised Dynamo nodes, in order to enable the reading of real-time information for each sensor in the field. Specifically, to make Thingsboard communicate with Dynamo, nodes were implemented through the C# language; these nodes were then imported into Dynamo in the form of packages using the login credentials of the Thinsboard account.
The case study focuses on the setting up a DT of the structural model. First, the structure was connected to a DHT 11 MEMS sensor, which monitors the required parameters of the current state and is interconnected to a microcontroller. The acquired data is stored on the cloud platform, which allows the data to be read and displayed correctly, filtering the type of data according to the selected sensor. The HBIM modelling of the tank followed the well-established steps of the Scan-to-BIM procedure. Firstly, the integrated point cloud was imported into the Autodesk ReCap environment, selecting just the area of interest. The topography of the site and the retaining walls were then modelled in Revit using system families and the cloud as a reference. Given the particular geometry of the barrel-vaulted cistern, "in-place" modelling was used. Text-based instance shared parameters were then assigned to the elements to be monitored. Hence, the shared parameters (i.e., "*Temperatura Interna", "Temperatura Esterna", "Umidità Interna", "Umidità Esterna"*) were populated, within the HBIM environment, through real-time data coming from the sensors (fig. 04); this was made possible employing Dynamo for Revit [Di Filippo et al. 2021, pp. 110-115].
Dedicated external APIs automatically connect to the ThingsBoard platform for real data acquisition and then, through a Dynamo visual script, directly to its DT in BIM. The actual interconnection between the sensor and the BIM is done through the generation of dedicated families and the setting up of shared parameters to be populated with the values derived from the effective conditions of the physical model in real-time. The use of real-time data can support conservators and restorers in their studies to simulate possible corrective actions on the DT, based on the immediate feedback (fig. 03). The aim is to safeguard the integrity of the structural asset and prevent possible alterations caused by excessive surface humidity and wet-dry cycles that can alter its physical characteristics.
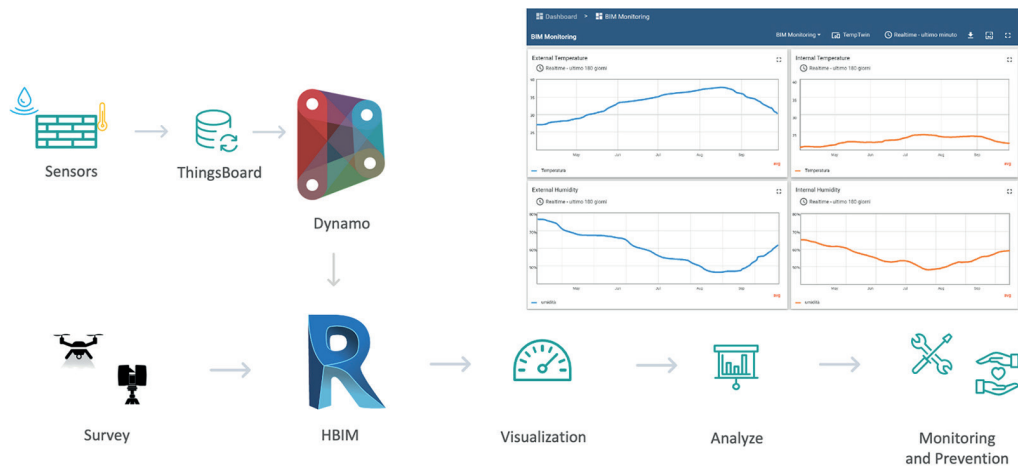
Fig. 03. Architecture of monitoring system and data monitoring visualization. Author's elaboration.
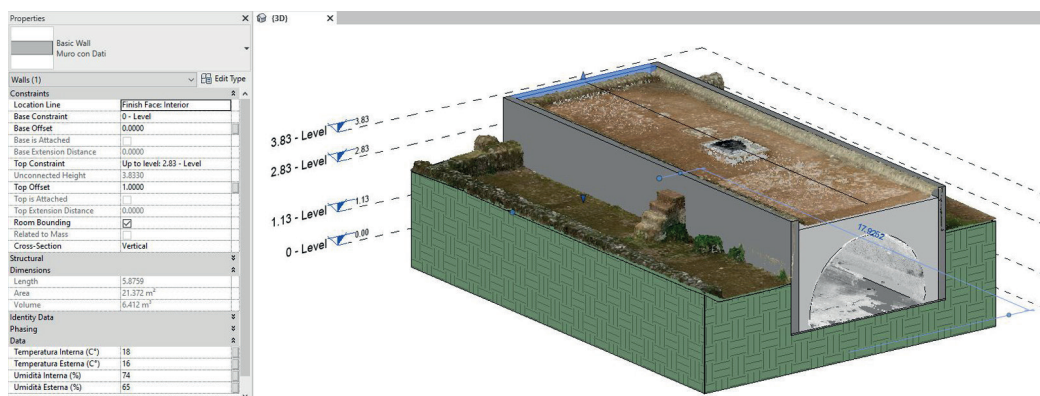
Fig. 04. HBIM model of the "Cisterna delle Navi" in Autodesk Revit. Author's elaboration.

Results and conclusions

The purpose of this work was to design a methodology to support conservators and restorers to monitor and visualize temperature and humidity data of a space of historical interest. The data from the sensors can be easily represented within a BIM environment to support decisions requiring interdisciplinary skills [Desogus et al. 2021]. The proposed methodology integrates the use of an IoT-based platform – Thingsboard – which enables communication between sensors and Dynamo software to access sensor data, automatically updating the information contained in the BIM model. Hence, the method that was introduced in the *Cisterna delle Navi* was based on a remote monitoring and decision-making system and it allowed the monitoring and characterisation of the environmental conditions inside the building to renovate, in order to preserve the masonry parts, plasters and wooden elements.

Once the concept of humidity and dew temperature was defined, alarm logic was introduced with immediate feedback. An active control of the climatic conditions of the under-study rooms was introduced and successfully validated. Finally, thanks to the data collected in a database, it was possible to create dedicated families to visualize and query the model in the BIM environment.

The experimental results, although preliminary, yielded promising outcomes. A future implementation of the system could include the application of Machine Learning techniques using the collected data and, possibly, several additional sensors that can be integrated with those already in place to enrich the different applicable approaches, such as the use of thermal cameras.

References

Boetto, G. (2002). La "cisterna delle navi" nella villa di Domiziano al Circeo. In *Archeologia subacquea: studi, ricerche e documenti,* 3, pp. 399-408.

Boje, C., et al. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. In *Automation in Construction,* vol. 114.

Colace, F., et al. (2021). *An IoT-based Framework to Protect Cultural Heritage Buildings.* IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2021. 7th IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2021. 23/27 August 2021, pp. 377-382.

Desogus, G., et al. (2021). BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings. In *Sustainability,* 13 (8), 4496.
<https://doi.org/10.3390/su13084496> (consultato il 21 marzo 2022).

Di Filippo, A., et al. (2021). Generative design for project optimization. In. *DMSVIVA 2021: 27th International DMS Conference on Visualization and Visual Languages,* pp. 110-115.

Fatta, F. (2015). *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying. Modeling, and Representation,* pp. 446-475.

Giordano, A. (2019). New interoperable tools to communicate knowledge of historic cities and their preservation and innovation. In Advances in Intelligent Systems and Computing, n. 919, pp. 34-43.

Ippoliti E., Massimetti M., Testa A. (2020). I*t's time for data! modulations of representation: Visible, perceptible, imaginable. Advances in Intelligent Systems and Computing.* 1st International and Interdisciplinary Conference on Image and Imagination, IMG 2019. Alghero. 4/5 July 2019. Volume 1140, pp. 1047-1060.

Limongiello, M., Ronchi, D., Albano, V. (2020). BLK2GO for DTM generation in highly vegetated area for detecting and documenting archaeological earthwork anomalies. In *Metrology for Archaeology and Cultural Heritage*, MetroArchaeo 2020, Trento, Virtual Conference, Italy ,22 - 24 ottobre 2020, pp. 316-321.

Scandurra, S., et al. (2018). *Integrated survey procedures for the virtual reading and fruition of historical buildings.* International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 42 (2), pp. 1037-1044.

Authors
Marco Limongiello, Università degli Studi di Salerno, mlimongiello@unisa.it
Angelo Lorusso, Università degli Studi di Salerno, alorusso@unisa.it
Anna Sanseverino, Università degli Studi di Salerno, fasanseverino@unisa.it
Barbara Messina, Università degli Studi di Salerno, bmessina@unisa.it

To cite this chapter: Limongiello Marco, Lorusso Angelo, Sanseverino Anna, Messina Barbara (2022). Conservazione predittiva di edifici storici attraverso un sistema basato sull'IoT/ Predictive preservation of historic buildings through IoT-based system. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers.* Milano: FrancoAngeli, pp. 2607-2620.

Isbn 9788835141938